

componentes de un tornillo registrado el 10 de abril de 1996 a las 01:34 (hora local) y la Fig. 8 muestra una vista en perspectiva del diagrama del movimiento de partículas tridimensional para una ventana de tiempo de 5 s cerca del máximo del sismograma del tornillo. La inspección visual muestra que el movimiento partículas en este segmento está casi completamente horizontal y en una dirección de SW-NE. En la mayoría de los tornillos en Galeras registrados en estaciones triaxiales la energía sísmica está concentrada en componentes N y E donde las amplitudes en las componentes horizontales son mayores que en la componente vertical.

Tabla IV. Formulario para el modelo de Helmholtz (Howe, 1976).

| | |
|--|--|
| $\ddot{x}(t) + 2\epsilon\dot{x}(t) + w_o^2 x(t) = \ddot{u}(t) = \frac{F(t)}{m} = \frac{S}{m} p(t)$ (8) | Es la ecuación diferencial del resonador de Helmholtz (Fig. 15) |
| $\frac{d^2 x}{dt^2} + 2hw_o \frac{dx}{dt} + w_o^2 x = \frac{S}{m} p(t)$ (9) | Otro modo de expresarla la ecuación diferencial |
| $w_o = 2\pi f_o = c \sqrt{\frac{S/L'}{V_o}}$ (10) | w_o es la frecuencia angular propia. Las altas frecuencias en el inicio de los tornillos podrían reflejar los procesos de disparo de las vibraciones del fluido. |
| $\epsilon = w_o h = \frac{c}{8\pi} \frac{(S/L')^2}{V_o}$ (11) | ϵ es el factor de amortiguamiento |
| $c = \sqrt{\frac{b}{\rho_f}}$ (12) | c : la velocidad del sonido o velocidad la onda acústica en el fluido y b es módulo de bulk del fluido y ρ_f es densidad del fluido |
| $S = \pi r_o^2$ (13) | S : sección transversal del cuello del cilindro y r_o radio del cuello del cilindro |
| $L' = L + 1.6r_o$ (14) | L' : longitud efectiva del cuello resonador |
| $V_o = \frac{c^3}{2\pi^2} \frac{1}{Q_o f_o^3}$ (15) y $\frac{S}{L'} = 2c \frac{1}{Q_o f_o}$ (16) | Respecto a las dimensiones del resonador, V_o : volumen, S : sección transversal del cuello y L' longitud efectiva |

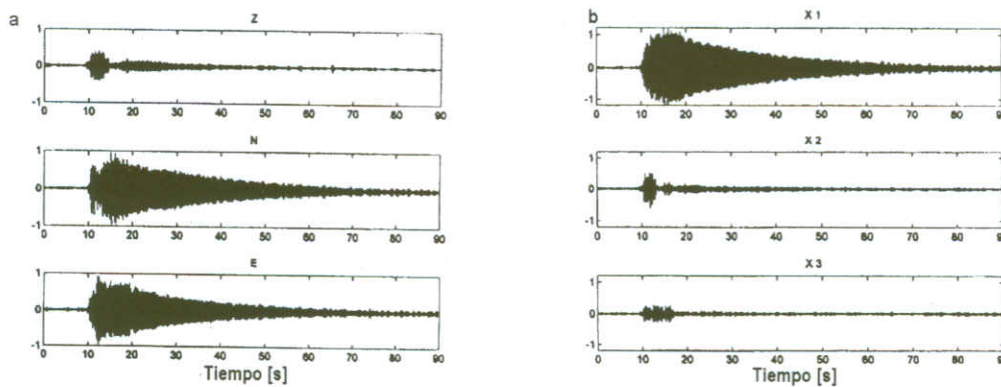


Fig. 7a,b. Sismogramas en velocidad ($\mu\text{m/s}$) del tornillo del 10 de abril de 1996 a las 01:34 hora local: a) en tres componentes de banda ancha después de ser filtrados con pasabandas b) en el sistema propio X_1 - X_2 - X_3 después de la transformación de los sismogramas.

Para calcular los ángulos de inclinación y acimut, se aplica un ajuste de mínimos cuadrados al elipsoide de polarización. Su sistema de ejes principales X_1 - X_2 - X_3 está definido por los valores propios ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) y los vectores propios (e_1, e_2, e_3) de la matriz de covarianza 3×3 de los sismogramas de las tres componentes del tornillo de la Fig. 7a, con $\vec{x}_i = \lambda_i \vec{e}_i$, donde $i=1,2,3$ corresponde a los valores propios mayor, intermedio y menor (Seidl y Hellweg, 1991). En la Fig. 7b el tornillo se rotó dentro de su sistema propio. En el sistema de valores propios, el tornillo puede resolverse en tres señales diferentes. X_1 , X_2 y X_3 .

Junto con el acimut y la inclinación del eje mayor del elipsoide de polarización, la rectilinearidad puede usarse como una característica para la parametrización y clasificación de sismogramas tornillo de tres componentes. El grado al cual la polarización es lineal puede ser descrito por la función de rectilinearidad $F=1-(\lambda_1/\lambda_2)$ donde $F=1$ es una polarización absolutamente lineal y $F=0$ es no polarizado (Kanasewich, 1981). La dirección de polarización está dada por el acimut, az , e inclinación, in , del vector propio para el mayor valor propio.

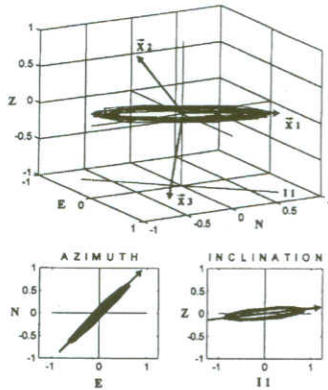


Fig.8. Diagramas de movimiento de partículas. En la parte superior una representación 3D para un segmento de 5 s del tornillo del 10 de abril de 1996. X_1, X_2, X_3 son los vectores propios de la matriz de covarianza. La relación de la raíz cuadrada de los valores propios es aproximadamente 5:1:1. Los diagramas 2D indican el acimut ($az=44^\circ$ = E desde la N) y la inclinación del eje mayor X_1 ($in=84^\circ$ de la vertical), lo que confirma la observación de que la mayoría de la energía sísmica se concentra en el plano horizontal. El valor $F=0,95$ indica un alto grado de rectilinearidad

El análisis del movimiento de partículas para el tornillo del 10 de abril en la estación de banda ancha Cráter-hq y de corto periodo Urcunina, muestra en general, que después del inicio del evento la polarización para los picos de frecuencia dominante es muy estable en ambas estaciones (Figs. 9a-b). Sin embargo, el movimiento de partículas para otros tornillos es más complejo.

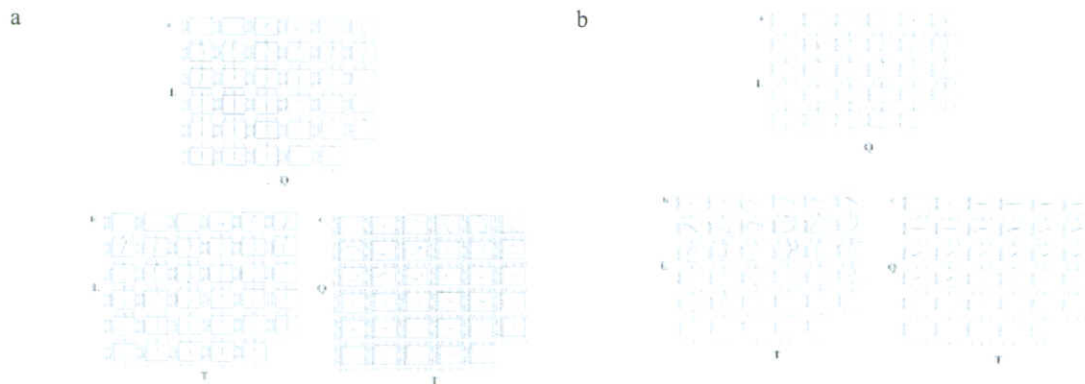


Fig. 9a-b. Movimiento de partículas para ventanas de tiempo de 0.5 s sobre un segmento de 17.5 s para el tornillo de abril 10/96. a) estación de banda ancha Cráter-hq y b) estación de corto periodo Urcunina. Los datos se filtraron con pasabandas entre 2.6 y 3.6 Hz. Los ejes L, Q y T corresponden al sistema de coordenadas de la onda; el eje L es paralelo a la dirección de propagación de la onda.

Un análisis detallado de la dependencia del tiempo de las variables de la ecuación (1), produce información sobre el proceso de excitación, acoplamiento y el medio (Tabla V), y parámetros como la frecuencia predominante, la polarización de los señales y el factor de amortiguamiento son sumamente estables (Seidl, et al., 1999; Tabla VI).

Tabla V. Condiciones para modelamiento de la fuente de tornillos. Los parámetros de la ecuación general (1) que describe un tornillo pueden relacionarse al proceso de la fuente o ser afectados por el medio.

| Parámetro | Proceso excitación | Fuente de la onda sísmica | Medio campo cercano |
|--------------|-----------------------|---|---------------------|
| $\vec{n}(t)$ | | Localización, tamaño, patrón de radiación | Scattering |
| $\varphi(t)$ | Aleatorio o impulsivo | | Scattering |
| $\alpha(t)$ | Estacionario | Resonador | |

| $A(t)$ | Función tiempo de fuente | Fuerza de acoplamiento | Atenuación, scattering, |
|--------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
|--------|--------------------------|------------------------|-------------------------|

Tabla VI. Resultados del análisis de los tornillos. Las características de los parámetros de la ecuación general (1) que describen un tornillo determinado por el análisis se lista a lo largo de sus implicaciones para modelo de la fuente del tornillo.

| | | | |
|---|---|--|--|
| $A(t) = A_c(t) + A_o e^{-\epsilon t} + b(t)$ | El parámetro de decaimiento, ϵ , es muy pequeño. El efecto de scattering, $b(t)$, es aleatorio y pequeño. | | |
| $\alpha(t) = \alpha_0$ $\epsilon(t) = \epsilon_0$ | La fuente de ondas sísmicas es un simple y débil resonador amortiguado. | | |
| $\varphi(t) = \varphi_0$ | El proceso de la excitación es impulsivo. | | |
| $\vec{n}(t) = \vec{n}_0$ | El tornillo proviene de una fuente de volumen pequeña. Los efectos de scattering son pequeños. | | |

Para los tornillos de Galeras, se ha definido el parámetro de "Esbeltez" como la relación entre la duración de la señal y su respectiva máxima velocidad del terreno obteniéndose valores que varían entre 5 a 145 s/ $\mu\text{m/s}$. En contraste, los eventos LP comunes en Galeras tienen valores de esbeltez menores de 10 s/ $\mu\text{m/s}$. Para los otros volcanes, no fue posible calcular este parámetro debido a la falta de respuestas instrumentales disponibles.

En general, las constantes de amortiguamiento para los tornillos están entre 0.002 y 0.02, en tanto, para los eventos LP comunes, varían entre 0.010 a 0.025, y para los sismos VT, este valor varía entre 0.010 y 0.040 (Gómez y Torres, 1997). Valores bajos implican un decaimiento lento de las ondas de coda. Los tornillos más largos (mayores de 100 s) muestran los valores más bajos de las constantes de amortiguamiento, normalmente entre 0.002 y 0.004. En Galeras, los Tornillos han tenido duraciones entre 25 s y 330 s. La frecuencia del pico con la mayor amplitud (frecuencia dominante), varía de un tornillos a otro. En los volcanes estudiados, se han observado frecuencias dominantes entre 0.7 Hz y 8.0 Hz (Gómez y Torres, 1997). La Tabla III muestra las frecuencias dominantes típicas y los constantes de amortiguamiento de las ondas de coda para otros volcanes.

La duración de la resonancia puede ser medida por el factor Q describiendo el amortiguamiento de oscilaciones. Los factores Q para los tornillos de Galeras están entre 31 a 250 y correspondiendo a valores de constantes de amortiguamiento de 0.016 a 0.002. Según Chouet (1992), altos valores de Q pueden lograrse a través de la presencia de burbujas de gas en el fluido magmático. Sin embargo, es difícil de explicar valores de Q mayores que 40 solamente agregando más burbujas al fluido. La tabla VII muestra la estimación de algunos factores que pueden afectar Q .

Tabla VII. Estimación de factores que pueden afectar Q

| | |
|--|--|
| La resonancia, y consecuentemente el factor Q , también dependen del contraste de impedancia Z entre el flujo de fluido y el material sólido (Aki et al., 1977): | $Z = \frac{\rho_s \alpha_s}{\rho_f c}$ (17) |
| ρ_s y ρ_f son las densidades del sólido y fluido, α_s es la velocidad de la onda compresional en el sólido, y c es la velocidad de la onda acústica del fluido. Asumiendo que $\lambda = \mu$ en el sólido, el contraste de impedancia es entonces (Chouet, 1992): | $Z = \sqrt{\frac{3\rho\mu}{\rho b}}$ (18) |
| Los valores grandes de Q implican un contraste de impedancia alto, y nosotros obtenemos valores de Z entre 20 y 159 para factores Q de 31 a 250 respectivamente. Con lo anterior es posible estimar un módulo de bulk b que va de 4.00×10^6 N/m ² a 2.60×10^8 N/m ² para valores de Z desde 20 a 159 respectivamente. El módulo de bulk nos permite entonces estimar la cantidad de burbujas de gas en el fluido magmático usando la expresión para la mezcla de líquido-gas (Aki et al., 1978): | $b = \frac{1}{\frac{1-\xi}{b_l} + \frac{\xi}{b_g}}$ (19) |
| ξ es la fracción de volumen de gas, y b_l y b_g son los módulos de bulk del líquido y del gas respectivamente. Para un gas molecular bajo presión P , el módulo de bulk del gas estará dado por (Aki et al., 1978): | $b_g = 1.4P$ (20) |
| Los factores Q aparentes para la fuente de los tornillos representan la suma de la pérdida de energía por ciclo debida a la radiación sísmica Q_r y pérdida de energía | $\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_v}$ (21) |